

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2021.06.023

PE燃气管受外压失效过程声发射信号规律

李俊,李琪,唐万文,史君林

(四川轻化工大学机械工程学院,四川自贡 643000)

摘要:为研究埋地聚乙烯(PE)燃气管受外压作用下破坏过程及声发射信号变化规律,利用多功能力学试验机在4种不同加载速度下进行恒速外压实验,首先在时域下对外压失效过程各阶段的声发射信号特征参数变化规律进行分析,然后应用频谱分析方法对不同加载速度下的外压破坏过程声发射信号的频谱规律进行研究。结果表明,外压失效过程大致分成四个阶段,第一阶段无明显的声发射信号产生;特征参数(能量计数、振铃计数)数值在第二阶段达到最大,第四阶段次之,第三阶段最小;外压失效破坏过程中,声发射信号的主频稳定在63~64 kHz范围内;声发射信号频率主要成分在60~70 kHz,120~130 kHz,180~190 kHz范围内。

关键词:聚乙烯燃气管;外压失效;声发射;特征参数;频谱分析

中图分类号: TQ322.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2021)06-0131-06

Law of Acoustic Emission Signal during PE Gas Pipes Failure under External Pressure

Li Jun, Li Qi, Tang Wanwen, Shi Junlin

(College of Mechanical Engineering, Sichuan University of Science and Engineering, Zigong 643000, China)

Abstract: In order to study the failure process of buried polyethylene (PE) gas pipe under external pressure and the change of acoustic emission signal, a multifunctional mechanical testing machine was used to conduct a constant external pressure experiment at 4 different loading speeds. First, in the time domain the characteristic parameters of the acoustic emission signal at each stage of the external pressure failure process were analyzed, and then the spectrum analysis method was used to study the frequency spectrum of the acoustic emission signal during the external pressure failure process under different loading speeds. The results show that the external pressure failure process are roughly divided into four stages, there is no obvious acoustic emission signal generation in the first stage; the value of characteristic parameters (energy count, ringing count) reaches the maximum in the second stage, followed by the fourth stage, and the third stage is the smallest. In the process of external pressure failure damage, the main frequency of the acoustic emission signal is stable in the range of 63–64 kHz; the frequency of the acoustic emission signal is mainly distributed in the range of 60–70 kHz, 120–130 kHz, and 180–190 kHz.

Keywords: polyethylene gas pipe; external pressure failure; acoustic emission; characteristic parameters; spectrum analysis

随着经济社会的快速发展和全球气候治理的需要,天然气清洁能源占比越来越大。聚乙烯(PE)管道由于其耐腐蚀、质轻价廉、容易施工、抗震性能好等优点,被广泛应用于天然气输送^[1]。埋地PE燃气管在管道上方覆土与建筑物静压力、地面交通循环载荷以及地质性沉降等作用下,可能引起管道被挤压变形^[2-5],甚至演化成管段失效,酿成安全事故^[6]。然而,至今尚没有可工程化的埋地PE燃气

管安全监测方法。

近年来,众多学者使用声发射技术对非金属材料展开相关研究。邬冠华等^[7]应用声发射技术对蜂窝夹层复合材料压缩损伤过程进行试验研究,得出复合材料压缩损伤破坏与声发射的幅值、能量、撞击、上升时间、持续时间和计数等特征参量相关。高华等^[8]基于声发射技术分析碳纤维复合材料层合板面内压缩损伤不同阶段的声发射信号特征,发

基金项目: 国家质检总局科研项目(2017QK121),过程装备与控制工程四川省高校重点实验室项目(GK201809)

通信作者: 李俊,教授,博士,主要研究方向为智能化系统安全保障与低位能源利用技术

收稿日期: 2021-03-15

引用格式: 李俊,李琪,唐万文,等. PE燃气管受外压失效过程声发射信号规律[J]. 工程塑料应用, 2021, 49(6): 131–136.

Li Jun, Li Qi, Tang Wanwen, et al. Law of acoustic emission signal during PE gas pipes failure under external pressure[J]. Engineering Plastics Application, 2021, 49(6): 131–136.

现不同损伤类型可通过声发射振幅及频率特征有效识别。陈霞等^[9]采用声发射观察层压板的压缩破坏过程,通过分析声发射信号的特征规律,表征了在压缩载荷下材料损伤的形式及其演化过程。孙振国等^[10]利用声发射技术对水泥土的无侧限压缩过程进行全程监测,通过对水泥土力学特性参数进行分析,验证了声发射信号参数可以在一定程度上反映材料的破坏程度。

上述研究表明,复合材料和水泥材料等非金属材料受外压失效过程中有明显的声发射信号。笔者基于多功能力学试验机对PE燃气管进行外压失效过程的声发射监测实验研究,通过失效过程、声发射信号特征参数以及声发射信号的频谱分析,探索埋地PE燃气管外压失效过程中的声发射规律,以期对埋地PE燃气管外压失效安全监测提供新的方法。

1 实验部分

1.1 原材料

PE燃气管:SDR11,宜宾普什集团有限公司。

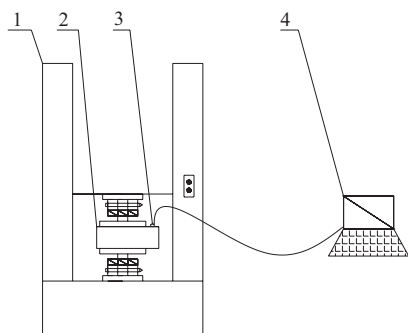
1.2 仪器与设备

微机控制电子万能试验机:CMT5504型,配套控制软件为SANS Power-Test,美特斯工业系统(中国)有限公司;

全信息声发射仪:DS5-16C型,配套软件DS5AE2020,北京软岛科技公司。

1.3 实验方案

声发射监测采用全信息声发射仪,数据采集门槛值设为3 mV,声发射传感器距离加载中心100 mm,实验采用恒速加载,加载速度分别为20,30,40,50 mm/min。实验系统如图1所示。实验过程中,管道受外压横截面呈规则或者不规则的椭圆形,如图2所示。



1—力學拉伸機;2—實驗管段;3—聲發射傳感器;
4—聲發射監測儀及電腦

图1 PE燃气管外压声发射监测实验示意图

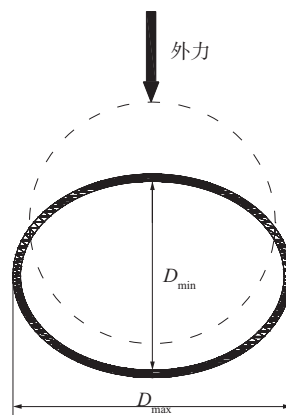


图2 管道受外压变形示意图

2 结果与分析

2.1 外压过程管道变形规律分析

按照GB 15558.1-2015采用椭圆度(不圆度)对管道变形程度进行定义,椭圆度 Δ 按式(1)^[11]计算。

$$\Delta = 2 \left(\frac{D_{\max} - D_{\min}}{D_{\max} + D_{\min}} \right) \times 100\% \quad (1)$$

式中: $D_{\max}$ 为形变后管道最大外径,mm; $D_{\min}$ 为形变后管道最小外径,mm。

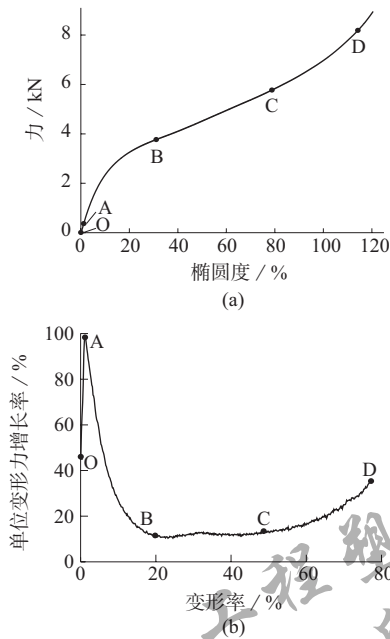
实验过程中,管道在外压作用下短轴长度(即管道的截面高度)不断减小,恒速加载过程中,外压力随着管道变形的难度而变化,除了考查外压力与管道椭圆度之间的关系,考查实验过程中单位位移外压力变化率与管材相对变形之间的关系也非常必要,以反映恒速加载过程中载荷变化快慢,两者之间的关系用式(2)表示。

$$y = \left(\frac{F_2 x_1}{F_1 x_2} - 1 \right) \times 100\% \quad (2)$$

式中: y 为单位位移外压力变化率,%; x_1, x_2 为管材外压过程中任意两相邻单位时间点的变形率,%; F_1, F_2 为当变形率是 x_1, x_2 时,外压力的大小,N。

外压作用下,外载荷与管道变形的力学关系如图3所示。根据实验过程压力及单位位移下外压力变化率,可以将整个外压加载过程可分为四个阶段,如图3所示。加载初期(OA段)时间很短,单位位移外压力变化率达98.34%,管道椭圆度为0%~1.2%;AB段,管道呈明显的椭圆变形,外压力增长迅速,在椭圆形的长轴两端附近出现塑性变形和材料破坏,但单位位移下的外压力变化率呈快速、非线性下降至11.56%,椭圆度从1.2%增加到31.08%;BC段,外压力随椭圆度的变化近乎线性增

长,单位位移下的外压力变化率基本恒定,椭圆度达到 78.79%;CD 阶段,维持管道加载的难度增加,椭圆长轴两端附近继续出现塑性变形和材料破坏,单位位移下的压力变化率持续小幅增长,椭圆度增长到管道上下内壁贴合。不同加载速度下的试验结果分析表明,上述四个阶段所对应的变化规律基本稳定。



a—外压力与管道椭圆度的关系;
b—单位位移下外压力变化率随相对位移的变化规律

图3 管道外压作用下变形的力学关系示意图

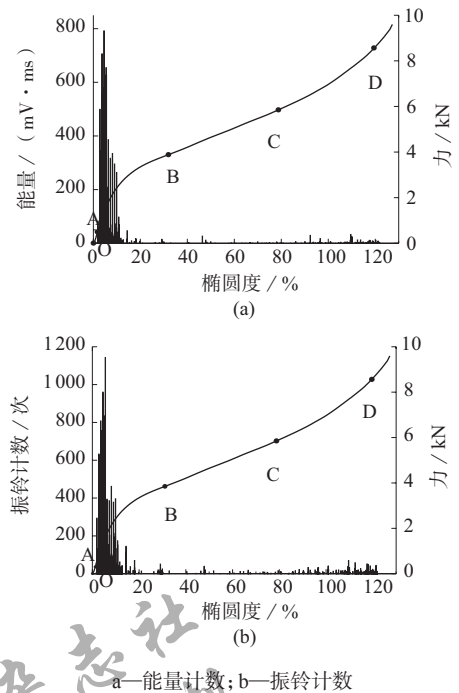
2.2 声发射信号特征参数变化规律分析

参数分析法是自 1950 年以来分析声发射信号最常用的方法之一,该方法基于多个特征参数来表征材料失效过程的声发射信号规律,常用特征包括:事件计数、振铃计数、能量计数、幅值等。笔者通过能量计数、振铃计数来研究外压作用下管道失效过程的声发射信号规律,参数定义见表 1^[12-14]。

表 1 声发射特征参数的定义、特点及用途

参数	定义	特点及用途
能量计数	信号检测波包络线下的面积,可分为总计数和计数率	反映事件的相对能量和相对强度。对门槛、声发射传播特性不甚敏感,可用于波源的类型鉴别,也可取代振铃计数
振铃计数	越过门槛信号的振荡次数,可采用总计数和计数率来表示	反映声发射信号的强度和频度

实验发现,不同加载速度下的声发射信号特征参数变化规律基本一致。图 4 为外压作用下 PE 燃气管失效过程变形及其声发射信号特征参数变化情况。



a—能量计数;b—振铃计数

图4 管道失效过程变形及其声发射信号特征参数

由图 4 可知,实验所用 PE 燃气管在外压作用下失效过程中声发射信号为突发性信号,失效过程中振铃计数与能量计数变化规律基本一致,但失效四个阶段的声发射信号规律不同。OA 阶段无明显声发射信号产生,说明该阶段主要是管道的弹性变形,材料无明显破坏;随着持续加载,维持恒速变形的压力迅速增加,管材内部(尤其是在椭圆长轴端部)发生较大塑性变形,甚至内部分子链断裂,声发射信号明显且活动频繁,能量计数与振铃计数值达到最大,尤其在 AB 的前半段;进入 BC 阶段后,外压力随管道变形呈稳定增长,材料内部主要发生塑性变形或分子链的滑移,声发射信号出现频率明显减弱,能量计数与振铃计数值很小;CD 阶段,管材维持恒速变形所需外压力快速增长,管材内部部分分子链出现断裂,声发射信号活动比较频繁,但由于此时管材内部的破坏主要发生在椭圆形的长轴端部,其它大部分地方无明显损伤,能量计数与振铃计数值相对于 AB 段仍较小。

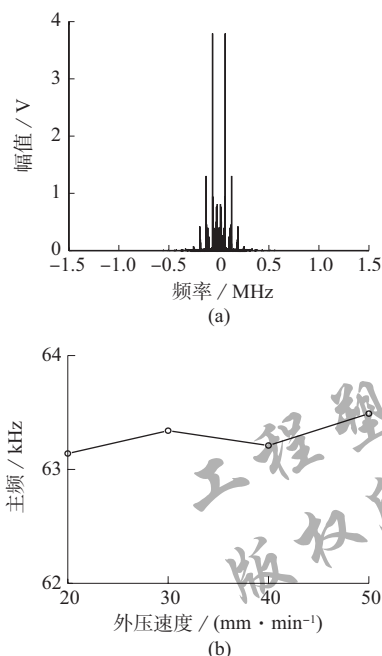
2.3 声发射信号频谱分析

为了分析声发射信号主频及频率结构,对不同加载速度下得到的 PE 燃气管变形失效过程声发射信号进行快速傅里叶变换,得到声发射信号的主频规律、各频率成分占比。

(1) 声发射信号主频分析。

外压作用下管道变形过程中声发射信号的幅

度谱及不同加载速度下的主频分布点如图5所示。由图5可知,在不同外压加载速度下,管材内部破坏产生的声发射信号频率分布规律基本一致,但主要频率的幅值随加载速度增加呈增大趋势,表明加载速度越大,材料内部破坏时吸收的能量也越大。随着加载破坏速度增加,管道破坏时产生的声发射信号主频维持在63~64 kHz范围内,平均主频为63.295 kHz,说明虽然加载速度大时破坏程度大,但是失效时声发射信号的主频基本不受加载速度影响,保持相对稳定。



a—外压过程声发射信号频谱示意图; b—主频分布示意图

图5 外压过程声发射信号幅度谱及主频分布规律

(2) 声发射信号频率成分占比分析。

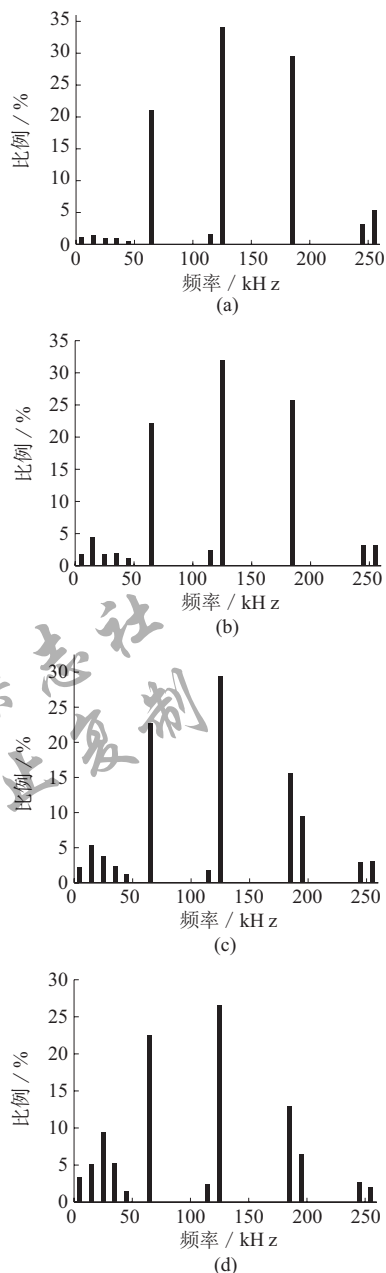
对声发射信号进行频率成分分析是为了了解其频率结构,频率成分占比采用式(3)计算。

$$R = f/F \quad (3)$$

式中: f 为相应频率范围内的频率数, F 为信号总的频率数。

图6为不同频率成分声发射信号占比示意图,表2列出了主要频率成分范围占比。

如图6所示,不同下载速度下,声发射信号频率成分基本相同,频率成分分布在0~260 kHz范围内,主要频率的分布也基本相同,只是不同子频的占比不同,这是由于虽然管道总体破坏的位置、破坏的形式和变形过程基本一致,微观上分子链发生断裂时机和形式基本一致,导致信号频率的分布规律基本一致。



加载速度: a—20 mm/min; b—30 mm/min;

c—40 mm/min; d—50 mm/min

图6 不同频率成分声发射信号占比示意图

表2 主要频率成分范围占比 %

加载速度 / (mm · min ⁻¹)	频率 / kHz		
	60 ~ 70	120 ~ 130	180 ~ 190
20	21.1	34.0	29.6
30	22.2	31.9	25.8
40	22.5	29.4	15.6
50	22.8	26.6	12.9

四种外压速度下占比较高的频率成分为60~70 kHz,120~130 kHz,180~190 kHz,这三种频率成分占比达到80%左右,这是由于管道在外压力作

用下呈椭圆变形破坏过程中,破坏的位置、破坏的形式和变形过程基本相似所致。

60~70 kHz 频率范围占比随加载速度增加而增大;120~130 kHz 与 180~190 kHz 频率范围占比随加载速度增加而减小;这是由于速度增加会导致整体破坏的时间缩短,高能态分子链未断裂完全便已进入外压第三阶段,由于管道强度提升,导致高频信号减少,而整体破坏的程度相同,所以主频略微增长,但是保持稳定。

随着外压速度的增加,0~50 kHz 较低频率成分的信号占比呈增加趋势,这是由于加载速度越快,管道进入第三阶段越快,越多高能态分子链转化为低能态,最后在第三、四阶段分子链逐步断裂,导致低频信号占比增加。

3 结论

(1) PE 燃气管道的外压失效过程大致包含四个阶段,第一阶段时间很短,单位位移外压力变化率达 98.34%,管道椭圆度仅为 0%~1.2%;第二阶段单位位移外压力变化率迅速下降至 11.56%,椭圆度从 1.2% 增加到 31.08%,管材相对变形达到 15% 左右;第三阶段单位位移外压力变化率基本恒定,椭圆度达到 78.79%,相对变形达到 40% 左右;第四阶段椭圆度大于 78.79%,相对变形从 40% 增长到管道上下内壁贴合。

(2) 外压失效过程声发射信号为突发性信号,主要源自椭圆长轴端部的破坏,振铃计数与能量计数变化规律基本一致,第二阶段尤其是前半段声发射活动频繁,能量计数与振铃计数值最大;第三阶段声发射活动减弱,能量计数与振铃计数值很小;第四阶段声发射活动比较频繁,能量计数与振铃计数值较小。

(3) 实验中四个加载速度下的声发射信号主频与幅度谱相近,主频分布范围在 63~64 kHz,平均主频为 63.295 kHz。声发射信号频率范围在 0~260 kHz,主要频率成分范围为 60~70 kHz,120~130 kHz,180~190 kHz,这三个范围频率成分占比达 80% 左右。60~70 kHz 频率成分占比随加载速度增加而增大,120~130 kHz 和 180~190 kHz 频率成分占比随加载速度增加而减小。

(4) 外压速度增加,声发射信号高频部分占比减小,低频部分占比增大,主频部分保持稳定并略有增长,可通过此趋势预测实际生产生活中的埋地 PE 燃气管道外压失效的速度。

参考文献

- [1] 李俊,唐万文,张学非,等. PE 拉伸失效破坏过程声发射信号分析及失效前兆预测[J]. 工程塑料应用,2018,46(9):106-111.
Li Jun, Tang Wanwen, Zhang Xuefei, et al. Acoustic emission signal analysis for tensile failure process of PE and prediction of failure precursor[J]. Engineering Plastics Application, 2018, 46(9):106-111.
- [2] 肖成志,王嘉勇,杨爱克. 静载作用下埋地管道数值模拟及其力学性能分析[J]. 防灾减灾工程学报,2018,38(1):22-29, 167
Xiao Chengzhi, Wang Jiayong, Yang Aike. Numerical simulation and mechanical performance analysis of buried pipes subjected to static load[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2018, 38(1):22-29, 167
- [3] 梁莉,苟文锦,田大浪,等. 交通荷载作用下埋地管道的三维力学性状分析[J]. 西安建筑科技大学学报:自然科学版,2020, 52(1):72-78.
Liang Li, Gou Wenjin, Tian Dalang, et al. Analysis on 3D mechanical characteristics of buried pipeline under traffic loading[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology: Natural Science Edition, 2020, 52(1):72-78.
- [4] 周敏,杜延军,王非,等. 地层沉降过程中埋地高密度聚乙烯(HDPE)管道力学行为研究[J]. 岩石力学与工程学报,2017, 36(S2):4177-4187.
Zhou Min, Du Yanjun, Wang Fei, et al. Mechanical response of buried HDPE pipes subjected to localized land subsidence[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(S2):4177-4187.
- [5] 张鹏,姚正学. 交通荷载作用下埋地含缺陷 PE 管道力学行为研究[J]. 中国安全生产科学技术,2020,16(1):25-31.
Zhang Peng, Yao Zhengxue. Study on mechanical behavior of buried PE pipeline with defect under traffic load[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2020, 16(1):25-31.
- [6] 顾军. 综述地面沉降对埋地燃气管道的影响研究[J]. 上海煤气, 2012(3):39-42.
Gu Jun. Research on the impact of underground gas pipeline caused by land subsidence[J]. Shanghai Gas, 2012(3):39-42.
- [7] 郭冠华,刘斯以,吴伟,等. 蜂窝夹层复合材料的压缩损伤声发射特征[J]. 无损检测,2013,35(12):42-45, 52.
Wu Guanhua, Liu Siyi, Wu Wei, et al. Acoustic emission characteristics of compression damage in honeycomb sandwich composite[J]. Nondestructive Testing, 2013, 35(12):42-45, 52.
- [8] 高华,熊超,殷军辉,等. 碳纤维复合材料层合板面内压缩损伤及

- 声发射特征分析[J]. 工程塑料应用, 2017, 45(12):107-111.
- Gao Hua, Xiong Chao, Yin Junhui, et al. Analysis of internal compressive damage and acoustic emission characteristics of carbon fiber composite laminates[J]. Engineering Plastics Application, 2017, 45(12):107-111.
- [9] 陈霞, 肖迎春. 含冲击损伤复合材料层压板压缩破坏机制的声发射特性研究[J]. 实验力学, 2013, 28(2):187-192.
- Chen Xia, Xiao Yingchun. Experimental investigation on compression failure mechanism of composite laminates with impact damage based on acoustic emission[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2013, 28(2):187-192.
- [10] 孙振国, 李明宝, 张旭. 水泥土无侧限压缩的声发射信号特性[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(32):310-314.
- Sun Zhenguo, Li Mingbao, Zhang Xu. Acoustic emission signal characteristics of cement soil in the process of unconfined compression[J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(32):310-314.
- [11] 肖成志, 王嘉勇, 何晨曦. 静/动载作用下埋地管道力学性能的试验分析[J]. 地下空间与工程学报, 2019, 15(3):747-754.
- Xiao Chengzhi, Wang Jiayong, He Chenxi. Experimental study on mechanical performance of buried pipes under static and cyclic[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2019, 15(3):747-754.
- [12] 沈功田, 耿荣生, 刘时风. 声发射信号的参数分析方法[J]. 无损检测, 2002(2):72-77.
- Shen Gongtian, Geng Rongsheng, Liu Shifeng. Parameter analysis of acoustic emission signals[J]. Nondestructive Testing, 2002(2):72-77.
- [13] 何毓明, 彭利坤, 宋飞. 基于特征参数和功率谱分析的液压滑阀内漏声发射检测实验研究[J]. 液压与气动, 2019(4):113-120.
- He Yuming, Peng Likun, Song Fei. Experimental study based on characteristic parameters and power spectrum analysis for acoustic emission detection of hydraulic spool valve internal leakage[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2019(4):113-120.
- [14] 罗明迪. 分级循环加卸载下细砂岩蠕变破坏声发射特性研究[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2018.
- Luo Mingdi. Study on acoustic emission characteristics of creep destruction of sandstone under staged cyclic loading and unloading[D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2018.
- (上接第 124 页)
- [13] 裴景克, 李文泽, 龚鹏剑, 等. 温度-应力耦合条件下聚四氟乙烯的压缩蠕变行为与寿命预测[J]. 高分子材料科学与工程, 2020, 36(8):122-129.
- Pei Jingke, Li Wenzhe, Gong Pengjian, et al. Compression creep behavior and life prediction of polytetrafluoroethylene under temperature-stress coupling condition[J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2020, 36(8):122-129.
- [14] 李红波, 赖亮庆, 黄艳华, 等. 聚酰亚胺填充聚四氟乙烯密封材料的性能[J]. 工程塑料应用, 2019, 47(11):30-35.
- Li Hongbo, Lai Liangqing, Huang Yanhua, et al. Performance of PI filled PTFE sealing materials[J]. Engineering Plastics Application, 2019, 47(11):30-35.
- [15] Shi Xuebo, Wu Chunlei, Rong Minzhi, et al. Improvement of creep resistance of polytetrafluoroethylene films by nano-inclusions[J]. Chinese Journal of Polymer Science, 2013, 31(3):377-387.
- [16] Kasem H, Etsion I. Experimental study of the effect of dwell time and normal load on static friction in creeping elastic-plastic polymer spherical contact[J]. Wear, 2014, 309(1-2):139-145.
- [17] 叶素娟, 黄兴, 王文虎, 等. PTFE 复合材料密封圈摩擦特性的对比研究[J]. 润滑与密封, 2019, 44(9):13-18.
- Ye Sujuan, Huang Xing, Wang Wenhui, et al. Study on tribological relevance of PTFE composites seals[J]. Lubrication Engineering, 2019, 44(9):13-18.
- [18] Paolo B V, Michele P, Enrico A, et al. Experimental investigation and numerical modeling of creep response of glass fiber reinforced polymer composites[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2021, 44(4):1 085-1 095.